新疆北部六种草地类型土壤碳氮磷生态化学计量特征

梁元也[1,2,3]， 范连连[1,2,3]， 马学喜[1,2,3]， 毛洁菲[1,2,3]， 惠婷婷[1,2,3]， 李耀明[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的空间变异关系到草地生态系统的功能与稳定性。海拔、气候、土壤性质和植被如何影响新疆北部典型牧区额尔齐斯河（简称额河）流域土壤碳氮磷化学计量的空间格局尚不清楚。本文选取了额河流域六种主要草地类型的65个样点（0~10 cm、10~20 cm土层）进行研究。结果表明：（1）高寒草甸、山地草甸、温性草甸草原有机碳（39.06~62.59 g·kg^{-1}）、总氮含量（3.87~6.95 g·kg^{-1}）以及六种草地类型的土壤总磷含量（0.53~1.59 g·kg^{-1}）总体上高于中国土壤平均值（24.56 g·kg^{-1}、1.88 g·kg^{-1}、0.56 g·kg^{-1}），而六种草地类型的土壤碳氮比（5.03~9.97）、碳磷比（7.50~52.38）以及温性草原、温性荒漠草原和温性荒漠土壤氮磷比（1.53~3.72）低于中国或全球土壤平均值（11.40、64.30、3.90）。（2）土壤碳氮磷含量以及碳磷比、氮磷比随着海拔升高（328~2655 m）、降水量增加以及温度降低而显著增加，并且与植被特征、土壤理化性质有显著的相关性。随着海拔的升高，土壤有机碳、总氮含量与土壤碳磷比在土层间的差异逐渐增加。（3）结构方程模型结果表明，海拔与气候因子对土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的影响效应最高，海拔通过改变温度、降水、植被特征、土壤理化性质影响土壤碳氮磷含量，最终影响生态化学计量。未来应进一步开展气候变化对土壤碳氮磷及其生态化学计量影响的跨区域尺度研究。

关键词：草地类型；海拔；温度；土壤养分；生态化学计量；额尔齐斯河流域

土壤养分是评价土壤肥力的指标，直接决定植物群落生长、结构以及生态系统的稳定性等，是影响生态系统结构和功能的关键因素[1-2]。生态系统中碳与氮、磷元素的循环过程相互耦合，生态系统碳储量是由氮、磷等关键营养元素的供应量控制的，因此，生态系统碳循环过程受到养分循环的强烈影响[3]。而生态化学计量是研究生态系统中能量平衡和多重化学元素平衡的科学，借助生态化学计量展开的生态系统限制性元素指示研究、元素平衡对生态交互作用的影响研究等，对于揭示全球变化背景下生态系统过程的影响因素及其作用机制具有重要意义，并成为全球变化研究的热点之一[3]。

目前，国内外关于土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的研究主要集中在不同环境因素影响下的差异分析，如海拔[2,4]、植被类型[5-6]、施肥[7]、土地利用方式[8]以及植被退化或恢复[9]等因素。海拔梯度是生态系统中的一种自然地理变化，不同海拔梯度下土壤养分及生态化学计量的变化可以反映气候以及植被类型对土壤养分分布的影响，因此，土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征在不同海拔梯度以及植被类型中的变化成为近年来的研究热点[10]。多数研究证明了土壤碳氮磷含量随海拔升高而增加的趋势[1-2,11]，然而土壤生态化学计量在不同海拔梯度下的变化特征尚存争议。目前的研究结果表明，在不同区域土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比随海拔升高呈现出显著升高[1-2,12]、降低[4]或先升后降[13]等变化趋势。随着研究者对冗余分析、结构方程模型、方差分解分析等统计方法的应用，土壤碳氮磷

收稿日期：2024-03-06；　**修订日期：**2024-05-14
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0603)；国家自然科学基金面上项目(42077327)
作者简介：梁元也(1997-)，女，硕士研究生，主要从事草地土壤研究. E-mail: liangyuanye20@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：李耀明. E-mail: lym@ms.xjb.ac.cn

及其生态化学计量特征的影响因素及驱动机制研究受到广泛关注,研究结果表明海拔、温度、光照、降水量、土壤理化性质等均为关键影响因素[1,5,14–15],但影响机制尚不清楚。目前,此方向的研究多集中于森林生态系统[2],国内的研究主要在祁连山[4]、黄土高原[9,16]等地,草地生态系统中的相关研究较少。而草地作为陆地生态系统的重要组成部分,占据世界陆地面积的30%左右,在涵养水源、保持水土、维持生态系统稳定以及参与全球碳循环等方面发挥着重要的作用,所以,研究草地生态系统土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征与影响因素十分必要[17]。

额河流域位于新疆北部,山地和盆地交替分布是其基本地貌特征,由于海拔差异悬殊而气候垂直分异明显,山区与荒漠温度、降水差异大,发育有多种多样的草地类型且呈现出明显的垂直带状分布规律,是研究草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的理想区域[11,18]。目前,新疆的相关研究较少,且研究区域集中在天山[12],关于额河流域以及阿尔泰山的研究较少。已有研究表明,额河流域的阿尔泰山南坡草地土壤有机碳、总氮含量在不同草地类型间有显著差异且与海拔高度间存在相关性[11,19],但这些研究的空间尺度较小或仅关注较少的草地类型,缺乏对额河流域大尺度海拔和植被类型调控下土壤生态化学计量特征的研究。而大规模的系统性研究有助于更好地探究土壤生态化学计量变化的驱动机制。

因此,本文在新疆北部典型牧区额河流域选择了六种主要草地类型,采集土壤测定其有机碳、总氮、总磷含量,计算其生态化学计量,旨在分析:(1) 额河流域不同草地类型土壤有机碳、总氮、总磷含量及其生态化学计量的变化特征;(2) 环境因子对土壤碳氮磷含量及其生态化学计量分布特征的影响。研究结果可为新疆北部草地土壤养分储量估算及养分限制评估提供基础数据,并为草地生态系统保护与利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

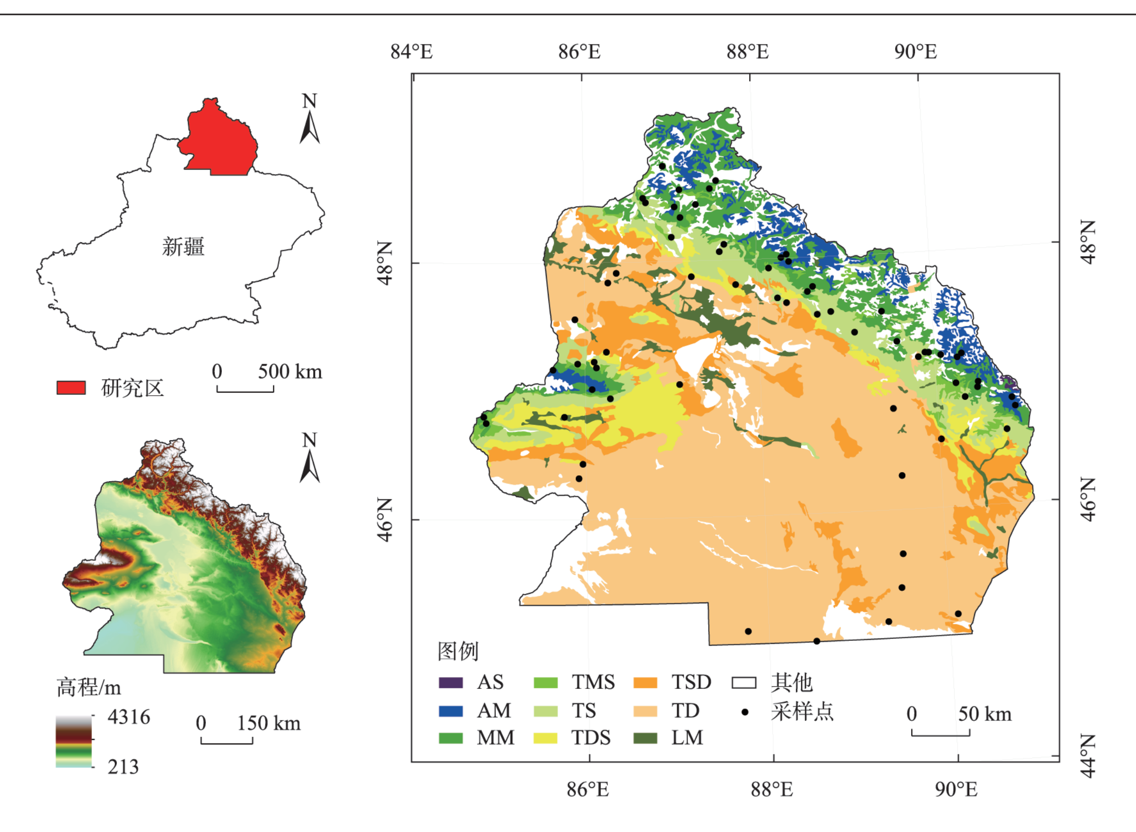
研究区地处新疆北部的额河流域(44°40′~49°30′N,84°50′~90°53′E)(图1),为新疆五大牧区之一,北部为阿尔泰山,中部为额河、乌伦古河两大河系的冲积平原,西部为萨吾尔山,南部包括准噶尔盆地北缘和古尔班通古特沙漠的一部分,总体呈现出东北高西南低的地势特征,海拔在213~4316 m之间。该地区属温带大陆性寒冷气候,年平均气温约4 ℃,年降水量200 mm左右。草地是该地区的主要植被类型,且草地类型的分布呈现出明显的垂直地带性,从荒漠到山地依次分布着低平地草甸、温性荒漠、温性草原化荒漠、温性荒漠草原、温性草原、温性草甸草原、山地草甸、高寒草甸、高寒草原。与草地类型相对应,该区主要土壤类型包括棕钙土、栗钙土、黑钙土等[20]。

1.2　研究方法

1.2.1　实验设计　在该区域的九种草地类型(图1)中选取了六种主要草地类型作为研究对象,即温性荒漠、温性荒漠草原、温性草原、温性草甸草原、山地草甸、高寒草甸。高寒草原、温性草原化荒漠、低平地草甸未被纳入本文研究范围,这是因为高寒草原在本研究区面积小,不具有代表性;温性草原化荒漠与温性荒漠草原性质相似;而低平地草甸多分布于河谷,不符合垂直地带性规律。以研究区每个草地类型面积所占比例及不同草地类型的空间异质性确定采样点个数。所有采样点为天然自由放牧样地,在实际采样的过程中选择了坡度、坡向相似的采样点,且对于同种草地类型,尽量选择了土壤类型、土壤质地、受干扰程度相似的采样点。按照上述采样点选取标准,本研究采集了高寒草甸点10个,山地草甸点16个,温性草甸草原点8个,温性草原点11个,温性荒漠草原点6个,温性荒漠点14个,共计65个。表1为各类型采样点的基本概况[21–22]。

1.2.2　植被调查及植物样品采集与测定　植被调查与植物样品采集在2022年5—8月(植物生长旺盛期)进行。在每个采样点随机设置3个1 m×1 m的样方,不同样方之间间隔10 m以上。用针刺法测定植被盖度[23]。用收获法采集样方内植物的地上部分,采集完成后装入标记好的信封中。回到实验室后放置于烘箱中烘干至恒重,称重后获取地上生物量(AGB,$g \cdot m^{-2}$)。

1.2.3　土壤样品采集与测定　收获样方内植物地上部分后,在样方内用梅花法采集土样。每个样方得到2个土壤样品,每个采样点得到6个土壤样品,65个采样点共计390个土壤样品。将每个土样过2 mm筛,放入密封袋中带回实验室后风干,用来测定土



注：底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作，审图号为新S(2021)023号，对底图边界无修改。AS表示高寒草原；AM表示高寒草甸；MM表示山地草甸；TMS表示温性草甸草原；TS表示温性草原；TDS表示温性荒漠草原；TSD表示温性草原化荒漠；TD表示温性荒漠；LM表示低平地草甸。下同。

图1 研究区及采样点

Fig. 1 Study area and sampling points

表1 新疆额河流域六种草地类型土壤和植被概况

Tab. 1 Soil and vegetation profiles of six grassland types in the Irtysh River Basin, Xinjiang

	高寒草甸	山地草甸	温性草甸草原	温性草原	温性荒漠草原	温性荒漠
土壤pH	5.05±0.14d	6.12±0.18c	7.05±0.08b	7.18±0.10b	8.47±0.45a	8.64±0.19a
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.05±0.04d	1.08±0.03d	1.26±0.06c	1.45±0.04b	1.62±0.04a	1.56±0.04a
土壤体积含水量/%	14.70±2.92a	8.77±0.98b	4.89±0.47c	3.90±0.45c	2.28±0.63c	2.51±0.41c
砂粒含量/%	30.75±6.58d	37.97±3.89d	44.26±4.02c	55.22±6.40b	75.54±6.99a	78.80±4.32a
粉粒含量/%	58.69±2.88a	54.03±3.31ab	48.21±3.42b	37.71±5.36c	20.45±5.87d	16.85±3.60d
黏粒含量/%	10.56±0.87a	8.00±0.69b	7.53±0.64b	7.07±1.09b	4.01±1.16c	4.03±0.74c
地上生物量/(g·m^{-2})	50.79±4.07b	153.24±30.52a	46.27±12.82b	36.24±7.66bc	27.91±9.36c	27.51±6.52c
植被盖度/%	83.91±4.19a	84.58±4.00a	58.71±8.80b	46.53±3.28c	26.30±8.76d	27.51±5.17d
土壤质地	粉质壤土	粉质壤土	壤土	砂质壤土	砂土	砂土
土壤类型	黑钙土	黑钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土

注：土壤质地根据国际制土壤质地分类系统(ISSS)确定[21]；土壤类型根据世界土壤资源参比基础(WRB)确定[22]。不同小写字母表示不同草地类型之间有显著差异。

壤碳氮磷含量、土壤pH与土壤机械组成。

土壤pH采用电极法测定(土水比为1:2.5)，土壤体积含水量(SWC)利用土壤水分测试仪测定，土壤容重(BD)采用环刀法测定(环刀体积60 cm^3)，土壤黏粒(<2 μm)、粉粒(2~20 μm)、砂粒(20~2000 μm)含量利用激光粒度仪测定(型号：马尔文2000)[21]，土壤有机碳采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定，土壤总氮采用凯式定氮法测定，土壤总磷采用$HClO_4$-H_2SO_4消煮-钼锑抗比色法测定。土壤指标测定参考《土壤农化分析》[24]。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 气候数据来源与处理 从国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)获得了研究区2022年的年平均气温(℃)和年降雨量(mm)数据集。通过ArcGIS 10.8软件分析处理，得到了每个采样点的年均温与年降水量数据。

1.3.2 数据分析 本研究的单因素方差分析(one-way ANOVA)、多重比较(LSD)、双因素方差分析(two-way ANOVA)在IBM Statistics SPSS 25.0软件中进行，以研究不同草地类型和不同土层间土壤碳氮磷含量及其化学计量的差异，$P<0.05$为差异具有显著性。在Origin 2023软件中进行Pearson相关分析以揭示变量间的两两线性关系，并用多项式拟合研究土壤碳氮磷含量及其生态化学计量随海拔与气候因子的变化趋势。在Amos软件中构建结构方程模型(SEM)，以分析环境变量对土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的影响途径。本文使用ArcGIS 10.8及Origin 2023软件作图。所有数值采用"平均值±标准误"表示。

2 结果与分析

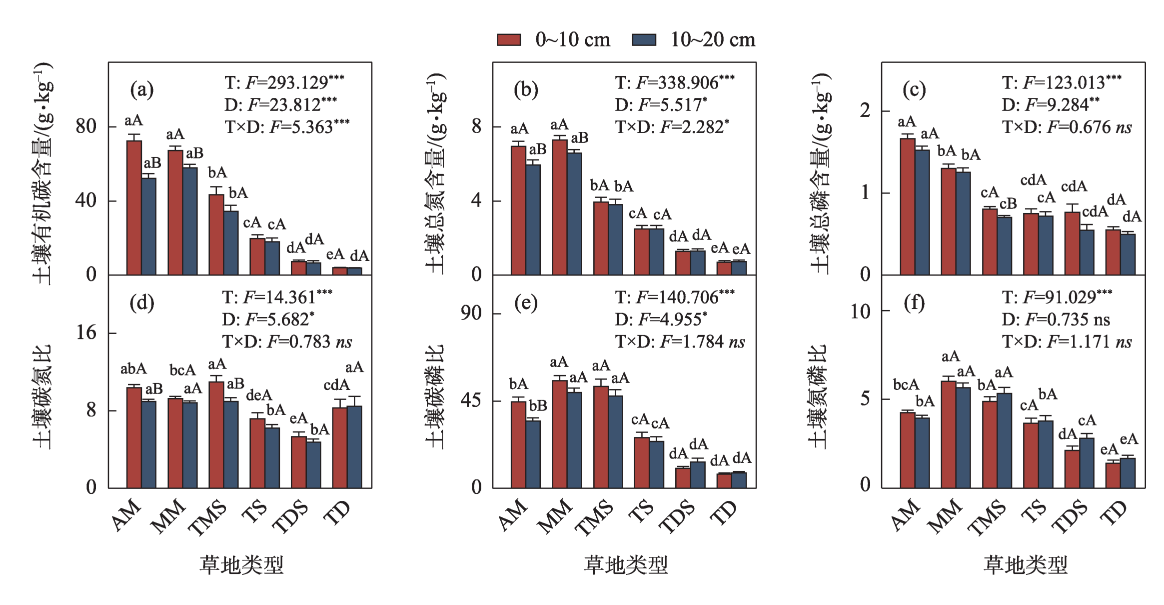
2.1 六种草地类型土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的变化特征

新疆额河流域土壤碳氮磷含量及其生态化学计量在六种草地类型间差异显著(图2)。六种草地类型的土壤有机碳、总氮、总磷含量在0~20 cm土层内的变化范围分别为3.75~72.40 g·kg^{-1}、0.70~7.31 g·kg^{-1}、0.50~1.66 g·kg^{-1}。高寒草甸、山地草甸土壤有机碳、总氮、总磷含量显著高于温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原与温性荒漠($P<0.05$)。高寒草甸、山地草甸土壤有机碳、总氮含量没有显著差异，但随土壤深度的增加而显著降低($P<0.05$)。

六种草地类型的土壤碳氮比、碳磷比、氮磷比在0~20 cm土层内的变化范围分别为4.73~10.98、7.20~55.49、1.40~6.02。高寒草甸、山地草甸、温性草甸草原土壤碳氮比显著高于温性草原与温性荒漠草原($P<0.05$)。山地草甸、温性草甸草原土壤碳磷比、氮磷比显著高于其他草地类型($P<0.05$)。土层对高寒草甸的土壤碳氮比、碳磷比以及温性草甸草原的土壤碳氮比有显著影响($P<0.05$)。

2.2 土壤碳氮磷含量及其生态化学计量与环境变量的相关性

新疆额河流域土壤碳氮磷含量及其生态化学计量随海拔、降水、温度的变化显著(图3，图4)。随着海拔的升高与年平均气温的降低，土壤有机碳、总氮、总磷含量显著增加($P<0.05$)。土壤有机碳、总氮含量随年降水量的提高而显著增加($P<0.05$)。土壤碳氮比与海拔、温度、降水无显著相关性。随着海拔的升高、降水量的增加以及温度的降低，土壤



注：T表示草地类型，D表示土层，T×D表示草地类型与土壤的交互作用。不同小写字母代表同一土层不同草地类型之间具有显著差异；不同大写字母代表同一草地类型不同土层之间具有显著差异。*表示$P<0.05$，**表示$P<0.01$，***表示$P<0.001$，*ns*表示$P>0.05$。下同。

图2 六种草地类型土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的变化特征

Fig. 2 Soil carbon, nitrogen and phosphorus concentration and their ecological stoichiometry of six grassland types

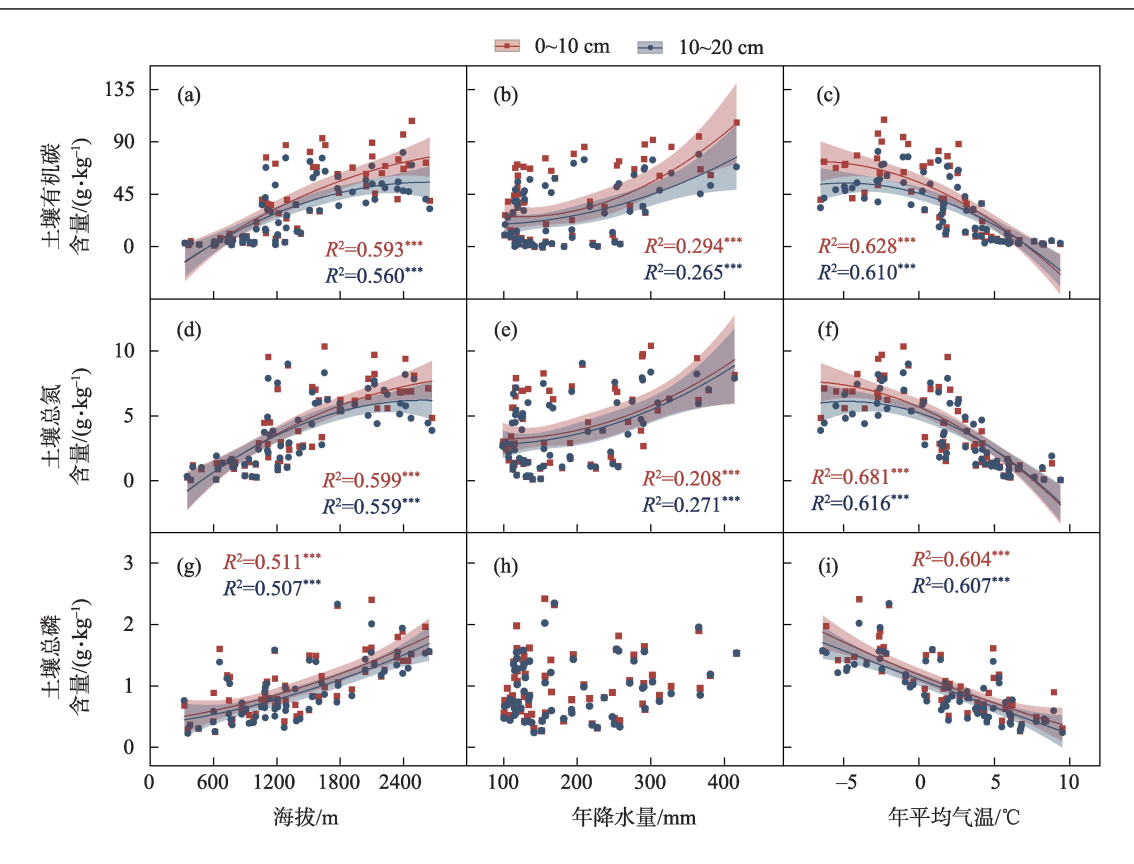


图3 土壤碳氮磷含量随海拔与气候因子的变化

Fig. 3 Changes of soil carbon, nitrogen and phosphorus concentration with altitude and climate factors

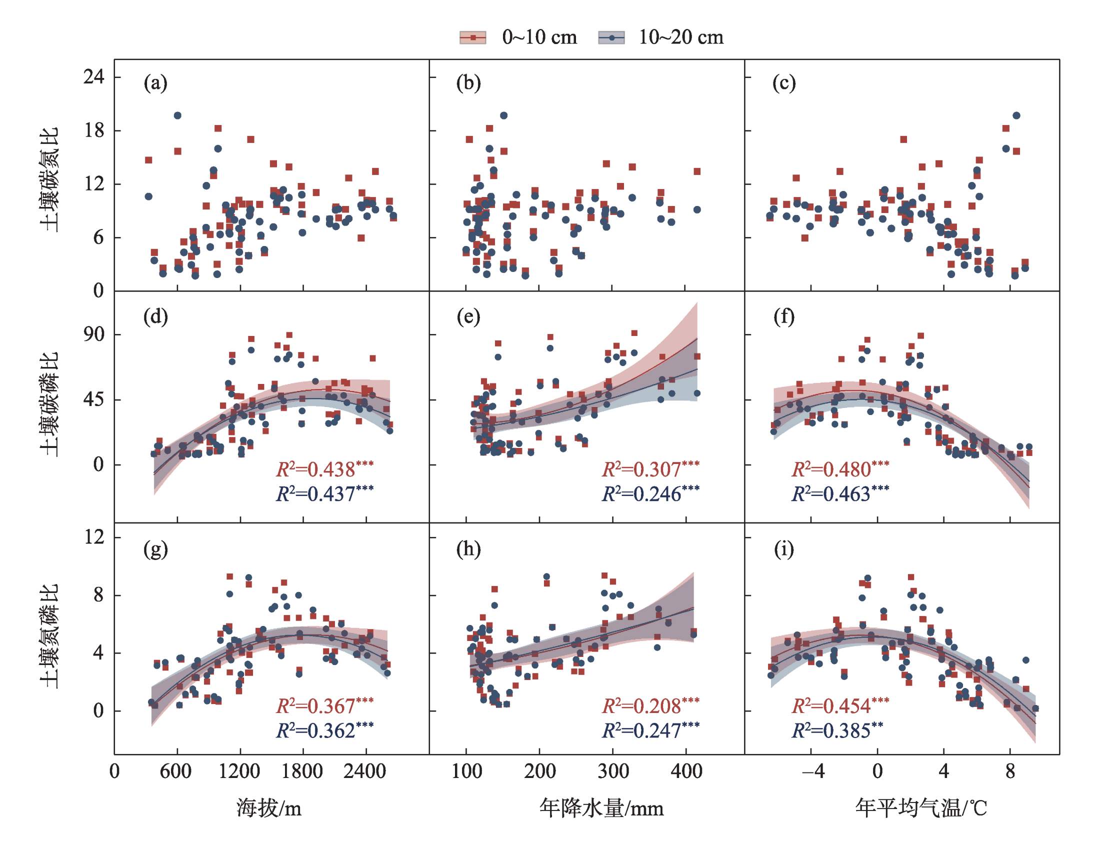


图4 土壤碳氮磷生态化学计量随海拔与气候因子的变化

Fig. 4 Changes of soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry with altitude and climate factors

碳磷比、氮磷比显著提高(P<0.05)，且土壤有机碳、总氮含量以及土壤碳磷比在土层间的差异逐渐增加。

土壤碳氮磷含量及其生态化学计量与土壤理化性质以及植被因子间也有显著的相关性(表2)。土壤碳氮比与土壤容重显著负相关，与植被盖度显著正相关(P<0.05)。土壤碳氮磷含量、碳磷比、氮磷比与土壤含水量、粉粒含量、黏粒含量、地上生物量、植被盖度显著正相关，与土壤pH、容重、砂粒含量显著负相关(P<0.05)。

2.3 土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的影响因素分析

通过构建结构方程模型(SEM)，解析环境因子对土壤碳氮磷及其生态化学计量变化的影响途径(图5)。结果表明，海拔、气候、植被特征、土壤理化性质解释了土壤碳氮磷含量及其生态化学计量86%和56%的变异。海拔与气候因子对土壤碳氮磷及其生态化学计量的间接效应高于直接效应，说明海拔与气候因子主要通过改变植被特征与土壤性质来间接影响土壤碳氮磷及其生态化学计量。海拔与气候因子、植被特征、土壤理化性质均对土壤碳氮磷含量有直接且显著的影响效应；植被特征、土壤机械组成、土壤碳氮磷含量显著影响土壤生态化学计量(P<0.05)。

3 讨 论

额河流域海拔差异悬殊，随着海拔升高，温度逐渐降低，降水量在一定高度范围内增加，使得不同海拔梯度的水热组合呈现出显著差异，形成气候分异[18]。在不同气候条件下，额河流域发育出多种多样的草地类型。随着海拔的升高，草地类型由荒漠类草地向典型草原、草甸转变，植物物种组成与生物量、土壤类型与理化性质等均发生显著变化[20]。由于同一海拔高度可能属于不同草地类型，植被特征、土壤性质也会呈现出差异性。因此，分析土壤碳氮磷含量及其生态化学计量在不同草地类型间的变化特征有利于更好地掌握额河流域土壤养分的分布格局。

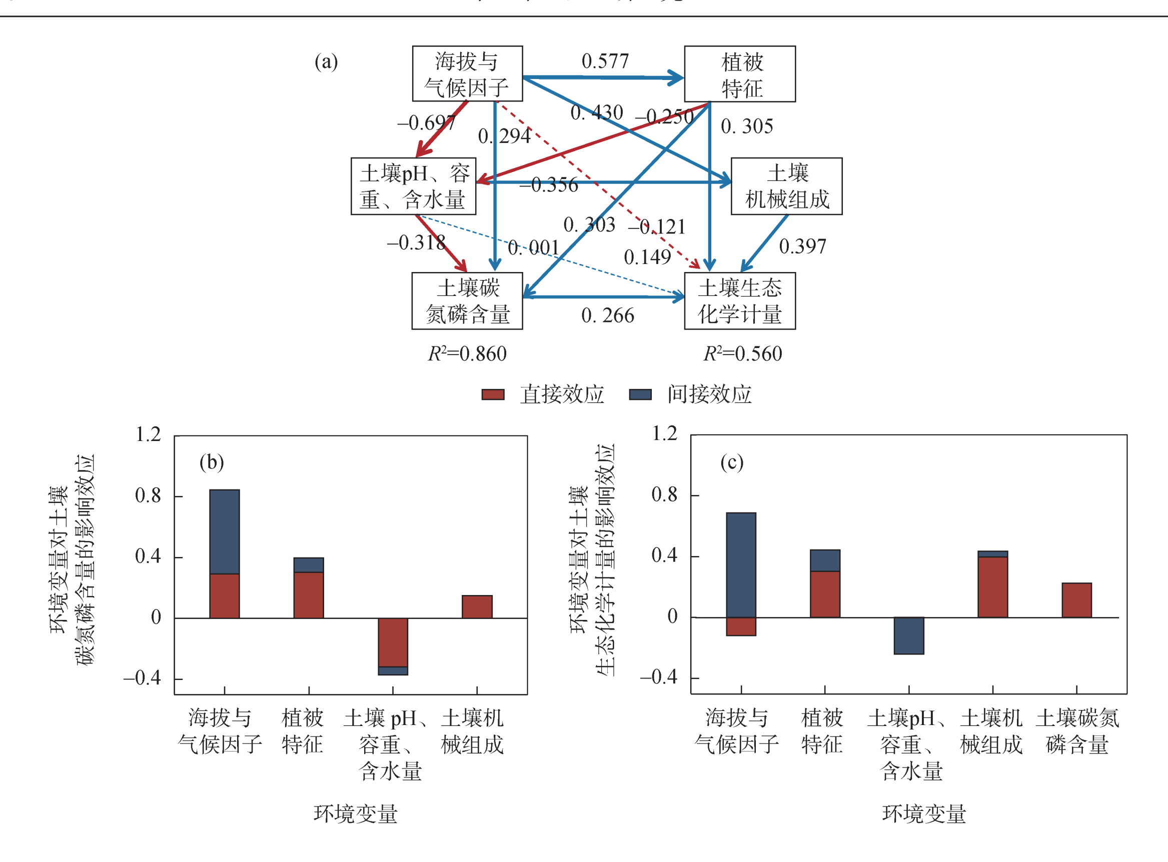
本研究的供试样点中，高寒草甸(62.38 g·kg^{-1})、山地草甸(62.59 g·kg^{-1})、温性草甸草原(39.06 g·kg^{-1})土壤有机碳含量高于我国土壤有机碳含量平均值(24.56 g·kg^{-1})[25]，温性草原(18.94 g·kg^{-1})、温性荒漠草原(6.96 g·kg^{-1})、温性荒漠(3.83 g·kg^{-1})则相反。高寒草甸、山地草甸、温性草甸草原、温性草原0~10 cm土层的总氮含量分别为6.45 g·kg^{-1}、6.95 g·kg^{-1}、3.87 g·kg^{-1}、2.49 g·kg^{-1}，高于中国土壤总氮含量平均水平(1.88 g·kg^{-1})，而温性荒漠草原(1.30 g·kg^{-1})、温性荒漠(0.72 g·kg^{-1})则低于中国土壤平均值[25]。六种草地类型的0~10 cm土层总磷含量在0.55~1.66 g·kg^{-1}之间，总体上高于中国土壤总磷的平均水平(0.56 g·kg^{-1})[1]，表明额河流域磷元素较为丰富。高寒草甸与山地草甸0~10 cm土层有机碳、总氮含量显著高于10~20 cm土层，这与Lu等[26]的研究结果一致，说明土壤表层(0~10 cm)直接与大气相互作用，是对气候变化最敏感的土层[27]。而母质风化是土壤磷的主要来源，所以，总磷含量在土层间没有显著差异[27]。荒漠地区降水少，土

表2 土壤碳氮磷含量及其生态化学计量与土壤理化性质、植被因子的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus concentration and their ecological stoichiometry with soil physical and chemical properties, and vegetation factors

	土壤有机碳/(g·kg^{-1})	土壤总氮/(g·kg^{-1})	土壤总磷/(g·kg^{-1})	土壤碳氮比	土壤碳磷比	土壤氮磷比
土壤pH	−0.765***	−0.788***	−0.768***	−0.190	−0.571***	−0.495***
土壤容重/(g·cm^{-3})	−0.878***	−0.861***	−0.657***	−0.403***	−0.764***	−0.625***
土壤体积含水量/%	0.686***	0.684***	0.606***	0.231	0.478***	0.397**
砂粒含量/%	−0.789***	−0.797***	−0.606***	−0.226	−0.721***	−0.645***
粉粒含量/%	0.805***	0.813***	0.619***	0.228	0.737***	0.661***
黏粒含量/%	0.632***	0.633***	0.478***	0.193	0.568***	0.502***
地上生物量/(g·m^{-2})	0.527***	0.555***	0.385**	0.111	0.460***	0.450***
植被盖度/%	0.832***	0.846***	0.665***	0.277*	0.704***	0.615***

注：*表示P<0.05，**表示P<0.01，***表示P<0.001。



注:气候因子包括年均温(℃)、年降水量(mm),植被特征包括地上生物量($g\cdot m^{-2}$)、植被盖度(%),土壤机械组成包括土壤砂粒(%)、粉粒(%)、黏粒(%)含量。蓝色和红色箭头分别表示正、负效应,实线和虚线分别表示显著和不显著路径,箭头上的数字为路径系数,箭头的宽度与路径系数大小成正比。

图5 基于结构方程模型(SEM)的土壤碳氮磷含量及其生态化学计量影响路径分析

Fig. 5 Path analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus concentration and their ecological stoichiometry based on structural equation model (SEM)

壤淋溶弱,土壤元素的入渗扩散速度相对较慢,这也是荒漠地区土壤碳氮磷含量垂直分布相对稳定的原因[26]。

土壤碳氮磷生态化学计量对于养分循环、凋落物分解和生境变异性发挥着至关重要的作用,并调节生态系统的功能和服务[3,27]。Chai等[28]的研究表明,中国典型陆地生态系统从沙漠到草原,土壤碳氮磷生态化学计量有显著变化。土壤碳氮比是评价土壤质量的指标之一,与有机质分解速率呈反比[3]。在本研究中,六种草地类型的土壤碳氮比变化范围为4.73~10.98,低于中国土壤碳氮比平均值11.40[25]。土壤微生物在生命活动过程中需要碳素和氮素来构成自己的身体,土壤碳氮比较高时,微生物需要输入氮来满足它们的生长。而额河流域土壤碳氮比较低,表明微生物对有机质具有较快的矿化作用,且土壤总氮含量虽然较低,但氮有效性较高,可以满足微生物的生命活动[1,3,29]。土壤有机质矿化速率快是温性草原、温性荒漠草原与温性荒漠土壤有机碳含量低于中国土壤平均值的原因。土壤碳磷比可以反映土壤磷的有效性,土壤碳磷比低表明微生物在矿化土壤有机质的过程中对磷的释放具有促进作用;反之,高土壤碳磷比会导致微生物生长所需的磷元素不足,从而与植物进行土壤无机磷竞争,不利于植物生长[30]。额河流域草地土壤碳磷比(7.20~55.49)低于全球草地土壤碳磷比平均值(64.30)[1],表明研究区土壤磷表现为净矿化,微生物分解有机质过程中不受磷的限制,土壤磷表现出较高的有效性,利于植物生长[31]。土壤氮磷比可以反映土壤氮磷平衡状况。额河流域高寒草甸、山地草甸和温性草甸草原土壤氮磷比平均值高于中国平均水平(3.90)[30],这是因为此区域植被丰富,植物生长对土壤中磷的需求量大[9];而温性草原、温性荒漠草原和温性荒漠则相反,从而使得其土壤总磷含量在中国土壤平均值之上。

根据环境控制论，地理、气候、土壤、植被等环境因子是土壤碳氮磷含量及其生态化学计量变化的主导因素，因此，当环境因子具有空间结构性时，土壤养分分布亦将具有空间变异性[32]。而额河流域山地与盆地交替分布，海拔差异悬殊，自然地理环境呈现出明显的垂直地带性。本文结构方程模型结果表明(图5)，海拔与气候因子对土壤碳氮磷含量及其生态化学计量变化的总效应最高，且间接效应高于直接效应，这说明海拔通过对热量、水分的再分配来影响植被特征与土壤性质[5,26,33]，最终改变土壤碳氮磷含量及其生态化学计量[34]。

温度通过以下几个方面对土壤碳氮磷含量及其生态化学计量产生影响：(1) 首先，温度降低使得土壤水分蒸发减少，土壤含水量增加，有利于植物生长。植物凋落物作为土壤碳、氮的主要来源，直接影响着土壤有机碳和氮素的输入和元素平衡[3]。(2) 年平均气温低导致微生物活性下降而对动植物残体的分解速度减缓，碳、氮矿化速率减慢，使有机碳和氮素得以在土壤中积累，以实现草地发挥碳封存的能力，同时改变土壤碳氮磷比[2,35]。(3) 磷主要来自于岩石风化，高温条件可加快岩石风化，而高海拔地区的低温条件会降低磷的解吸速率使土壤总磷含量增大[16,36]。随着海拔升高以及温度降低，植被盖度增加，植物生长所需的磷增加，与微生物形成竞争吸收土壤有效磷的现象，导致土壤碳磷比增加[3,9,25]。海拔的变化不仅造成了温度的差异，还导致了降水的改变。在额河流域，土壤碳氮磷含量以及碳磷比、氮磷比随降水量的提高而显著增加(图3，图4)。水分是干旱区植被生长的限制资源，中高海拔地区降水量高且由于温度低而蒸发较慢，土壤含水量高，可以支持更高的植被盖度和地上生物量从而增加土壤养分输入。另一方面，降水影响土壤元素的淋溶扩散[26]。此外，降水还可以通过改变土壤结构与理化性质以及土壤微生物活性等来影响土壤碳氮磷含量及其生态化学计量[35]。

土壤理化性质同样显著影响土壤碳氮磷含量及其生态化学计量(图5)。相关性分析的结果也表明，土壤碳氮磷含量、碳磷比、氮磷比与土壤含水量、粉粒含量、黏粒含量显著正相关，与土壤pH、容重、砂粒含量显著负相关(表2)。土壤容重是土壤结构的体现，在本研究中，土壤容重随海拔的升高而显著降低，土壤由紧实变为疏松，土壤结构得到改善，土壤养分固持能力得到提高，这将更有益于土壤保持养分平衡[5]。土壤水分是土壤中元素运移及循环的重要载体，可以直接影响土壤理化性质和植物生长，以及调节微生物氮磷代谢[6,37]；土壤pH通过影响微生物群落结构、活性、生物量影响有机质分解速率，研究表明微酸性土壤具有良好的平衡养分供应能力[2,26,38]。粉粒和黏粒土壤颗粒较细，具有较高的比表面积和吸附能力，因此，土壤有效养分含量更高[39]。同时，粉粒和黏粒具有较高的持水能力，进而影响土壤养分含量[5]。其中土壤黏粒可以通过与多价金属的键桥与有机质键合形成有机矿质复合体，使得有机碳难以被微生物分解。Li等[40]的研究结果表明，土壤碳磷含量、氮磷比与土壤黏粒含量显著正相关，这与本文的研究结果一致。

此外，随海拔变化的其他环境因子也可能改变土壤碳氮磷含量及其生态化学计量，例如，地下生物量、微生物生物量及其群落结构、土壤团聚体分布等，均是土壤养分积累及平衡的重要影响因素[35]。额河流域是新疆的重要牧区，牧民的放牧活动也会改变土壤理化性质，影响土壤养分分布。气候变暖和干旱加剧可对干旱区碳氮磷含量及其生态化学计量造成直接或间接影响。因此，未引入结构方程模型的其他因子也可能对该地区土壤养分分布有重要作用，未来的研究应增加这些因子，全面揭示额河流域养分分布的影响机制。

4 结 论

通过对额河流域土壤碳氮磷含量及其生态化学计量在不同草地类型间分布特征的分析，得出以下结论：

(1) 研究区土壤碳氮比(4.73~10.98)低于全国平均水平(11.4)，说明土壤有机质矿化速率快，导致温性草原($18.94\ g\cdot kg^{-1}$)、温性荒漠草原($6.96\ g\cdot kg^{-1}$)、温性荒漠($3.83\ g\cdot kg^{-1}$)土壤有机碳含量低。温性荒漠草原、温性荒漠土壤总氮含量虽然较低，但可满足微生物生命活动需求。

(2) 研究区土壤碳磷比(7.20~55.49)低于全球草地土壤碳磷比平均值(64.30)，微生物分解有机质过程中不受磷的限制，土壤磷表现出较高的有效性，有利于植物生长。

(3) 高寒草甸、山地草甸和温性草甸草原植被丰富，植物生长对土壤中磷的需求量大，导致土壤

氮磷比较高；而温性草原、温性荒漠草原和温性荒漠土壤氮磷比低于中国土壤平均值，土壤总磷含量在中国土壤平均值之上。

（4）海拔与气候因子主导了额河流域土壤碳氮磷含量及其生态化学计量的变化特征。海拔通过对热量、水分的再分配，改变植被特征、土壤理化性质，最终影响土壤碳氮磷含量及其生态化学计量。

参考文献（References）：

[1] 庞金凤, 张波, 王波, 等. 昆仑山中段北坡不同海拔梯度下土壤生态化学计量学特征[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 178-185. [Pang Jinfeng, Zhang Bo, Wang Bo, et al. Characteristics of soil ecological stoichiometry under different elevation on the north slope of Kunlun Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(1): 178-185.]

[2] Kumar A, Kumar M, Pandey R, et al. Forest soil nutrient stocks along altitudinal range of Uttarakhand Himalayas: An aid to Nature Based Climate Solutions[J]. Catena, 2021, 207: 105667.

[3] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947. [Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.]

[4] 高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 等. 祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 219-227. [Gao Haining, Li Caixia, Sun Xiaomei, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 219-227.]

[5] Tian L M, Zhao L, Wu X D, et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 192-202.

[6] Huang L, Hu H, Bao W K, et al. Shifting soil nutrient stoichiometry with soil of variable rock fragment contents and different vegetation types[J]. Catena, 2023, 220: 106717.

[7] Xu H W, Qu Q, Li G W, et al. Impact of nitrogen addition on plant-soil-enzyme C-N-P stoichiometry and microbial nutrient limitation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 174: 108834.

[8] Chen L L, Wang K X, Baoyin T. Effects of grazing and mowing on vertical distribution of soil nutrients and their stoichiometry (C:N:P) in a semi-arid grassland of North China[J]. Catena, 2021, 206: 105507.

[9] Ren C J, Zhao F Z, Kang D, et al. Linkages of C:N:P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland[J]. Forest Ecology & Management, 2016, 376: 59-66.

[10] 李新星, 刘桂民, 吴小丽, 等. 马衔山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 758-765. [Li Xinxing, Liu Guimin, Wu Xiaoli, et al. Elevational distribution of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ecological stoichiometry on Maxian Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 758-765.]

[11] Bi X, Li B, Nan B, et al. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under various grassland types along a transect in a mountain-basin system in Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 612-627.

[12] 郁国梁, 马紫荆, 吕自立, 等. 海拔和植物群落共同调节天山中段南坡巴伦台地区天然草场土壤化学计量特征[J]. 草业学报, 2023, 32(9): 68-78. [Yu Guoliang, Ma Zijin, Lv Zili, et al. Altitude and plant community jointly regulate soil stoichiometry characteristics of natural grassland in the Baluntai area on the southern slope of the middle Tianshan Mountains, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(9): 68-78.]

[13] 张一帆, 武海涛, 刘吉平, 等. 长白山地土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量垂直特征[J]. 环境生态学, 2023, 5(1): 7-15, 81. [Zhang Yifan, Wu Haitao, Liu Jiping, et al. Vertical characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and ecological stoichiometry in the Changbai Mountains[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(1): 7-15, 81.]

[14] Hu B F, Xie M D, Li H Y, et al. Stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland soils in southern China: Spatial pattern and related dominates[J]. Catena, 2022, 217: 106468.

[15] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, et al. Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC) [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 104: 152-163.

[16] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996. [Li Ting, Deng Qiang, Yuan Zhiyou, et al. Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2988-2996.]

[17] Zhang X R, Zhang W Q, Sai X, et al. Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a *Stipa kirschnii* steppe of Inner Mongolia[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 219: 105327.

[18] 张新时. 天山北部山地-绿洲-过渡带-荒漠系统的生态建设与可持续农业范式[J]. 植物学报, 2001, 43(12): 1294-1299. [Zhang Xinshi. Ecological restoration and sustainable agricultural paradigm of mountain-oasis-ecotone-desert system in the north of the Tianshan Mountains[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(12): 1294-1299.]

[19] 阿斯太肯·居力海提, 董乙强, 李靖, 等. 禁牧对不同气候区蒿类荒漠植被和土壤养分及化学计量特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 157-164. [Asitaiken Julihaiti, Dong Yiqiang, Li Jing, et al. Effects of grazing exclusion on nutrition and stoichiometry characteristics of *Artemisia* desert vegetation and soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 157-164.]

[20] 杨琳. 新疆阿勒泰地区天然草地毒害草种群分布与危害及防

控调查[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. [Yang Ling. Investigation on Population Distribution, Harm and Control of Poisonous Grass on Natural Grassland in Altay Region of Xinjiang[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019.]

[21] 何海龙, 齐雁冰, 吕家珑, 等. 中国土壤质地分类系统的发展与建议修订方案[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3), 501-510. [He Hailong, Qi Yanbing, Lv Jialong, et al. Development and revision of the Chinese soil texture classification system[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3): 501-510.]

[22] Wrb I W G. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps[M]. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015.

[23] 李娅丽, 柳小妮, 张德罡, 等. 陇中温性草原不同草地型植被特征和土壤理化性质研究[J]. 草地学报, 2023, 31(11): 3405-3414. [Li Yali, Liu Xiaoni, Zhang Degang, et al. Vegetation characteristics and soil physicochemical properties of different grassland types of temperate steppe in Longzhou[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11): 3405-3414.]

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. [Bao Shidan. Agrochemical Analysis of Soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.]

[25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1-3): 139-151.

[26] Lu J N, Feng S, Wang S K, et al. Patterns and driving mechanism of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry across northern China's desert-grassland transition zone[J]. Catena, 2023, 220: 106695.

[27] Zhang K, Su Y Z, Yang R. Variation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and biogeographic factors across the desert ecosystem of Hexi Corridor, northwestern China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 49-57.

[28] Chai H, Yu G R, He N P, et al. Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems [J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(5): 549-560.

[29] 李敏, 孙杰, 陈雪, 等. 荒漠植物叶片-土壤化学计量及植物内稳态特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 104-113. [Li Min, Sun Jie, Chen Xue, et al. Leaf-soil stoichiometry and homeostasis characteristics of desert-related plants[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 104-113.]

[30] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 305-314. [Tao Ye, Wu Ganlin, Liu Yaobin, et al. Soil stoichiometry and their influencing factors in typical shrub communities in the Gurbantunggut Desert,China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(2): 305-314.]

[31] Heuck C, Weig A, Spohn M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 85: 119-129.

[32] 王健铭, 王文娟, 李景文, 等. 中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J]. 生物多样性, 2017, 25(11): 1192-1201. [Wang Jianming, Wang Wenjuan, Li Jingwen, et al. Biogeographic patterns and environmental interpretation of plant species richness in desert regions of Northwest China[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(11): 1192-1201.]

[33] Luo, Y, Peng Q W, Li K H, et al. Patterns of nitrogen and phosphorus stoichiometry among leaf, stem and root of desert plants and responses to climate and soil factors in Xinjiang, China[J]. Catena, 2021, 199: 105100.

[34] Feyissa A, Raza S T, Cheng X. Soil carbon stabilization and potential stabilizing mechanisms along elevational gradients in alpine forest and grassland ecosystems of Southwest China[J]. Catena, 2023, 229: 107210.

[35] 王甜, 徐姗, 赵梦颖, 等. 内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J]. 植物生态学报, 2017, 41(11): 1168-1176. [Wang Tian, Xu Shan, Zhao Mengying, et al. Allocation of mass and stability of soil aggregate in different types of Nei Mongol grasslands[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(11): 1168-1176.]

[36] 刘爱琴, 严加亮, 侯晓龙, 等. 武夷山自然保护区不同海拔土壤磷素的分布规律[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 310-316. [Liu Aiqin, Yan Jialiang, Hou Xiaolong, et al. Heterogeneity distribution of soil phosphorus in Wuyishan Nature Reserve[J]. Journal of Forest & Environment , 2015, 35(4): 310-316.]

[37] Cui Y X, Wang X, Zhang X C, et al. Soil moisture mediates microbial carbon and phosphorus metabolism during vegetation succession in a semiarid region[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 147: 107814.

[38] Zhou Z H, Wang C K, Luo Y Q. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3072.

[39] Du H Q, Li S, Webb N P, et al. Soil organic carbon (SOC) enrichment in aeolian sediments and SOC loss by dust emission in the desert steppe, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 798: 149189.

[40] Li Y Q, Ma J W, Xiao C, et al. Effects of climate factors and soil properties on soil nutrients and elemental stoichiometry across the Huang-Huai-Hai River Basin, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 1970-1982.

Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in six grassland types in northern Xinjiang

LIANG Yuanye[1,2,3], FAN Lianlian[1,2,3], MA Xuexi[1,2,3], MAO Jiefei[1,2,3], HUI Tingting[1,2,3], LI Yaoming[1,2,3]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Spatial variations in soil carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations, as well as their ecological stoichiometry, in grasslands are related to the function and stability of grassland ecosystems. The Irtysh River Basin exhibits a significant disparity in altitude, remarkable climate variation, and diverse grassland types that display a vertical zonal distribution. Nevertheless, there are no clear data on the influence of altitude, climate, soil properties, and vegetation on the spatial patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry in the Irtysh River Basin, which is a typical pastoral area in Xinjiang. Therefore, this study investigated 65 sample points from six main grassland types (temperate desert, temperate desert steppe, temperate steppe, temperate meadow steppe, mountain meadow, and alpine meadow) in the Irtysh River Basin at depths of 0−10 and 10−20 cm. The following results were obtained: (1) The soil organic carbon (39.06−62.59 $g \cdot kg^{-1}$), total nitrogen (3.87−6.95 $g \cdot kg^{-1}$), and total phosphorus (0.53−1.59 $g \cdot kg^{-1}$) concentrations of alpine meadow, mountain meadow, and temperate meadow steppe were higher than the average concentrations of Chinese soil. However, the soil C:N (5.03−9.97) and C:P (7.50−52.38) ratios, as well as the soil N:P (1.53−3.72) ratios of temperate steppe, temperate desert steppe, and temperate desert, of the six grassland types were lower than the average ratios of Chinese soil (2) The concentrations of soil carbon, nitrogen, and phosphorus, as well as the C:N and C:P ratios, increased significantly with increasing altitude (328−2655 m) and precipitation and decreasing temperature. These parameters also exhibited significant correlations with soil physicochemical properties and vegetation characteristics. With increasing altitude and precipitation and decreasing temperature, the differences in soil carbon and nitrogen concentrations and soil C:P ratios gradually increased among soil layers. (3) The structural equation model revealed that altitude and climate exerted the highest impact on soil carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations, as well as on their ecological stoichiometry. Altitude affected soil carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations by changing the temperature, precipitation, vegetation characteristics, and soil physicochemical properties, ultimately affecting ecological stoichiometry. Future research should further explore the impact of climate change on soil carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations, as well as on their ecological stoichiometry, at a regional scale. This study provides basic data and a theoretical basis for estimating soil nutrient storage, as well as for protecting and utilizing grassland ecosystems in the Irtysh River Basin.

Keywords: grassland type; altitude; temperature; soil nutrient; soil ecological stoichiometry; Irtysh River Basin